

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-140317

(43)Date of publication of application : 17.05.2002

(51)Int.Cl.

G06F 17/13
G05B 13/02

(21)Application number : 2000-331314

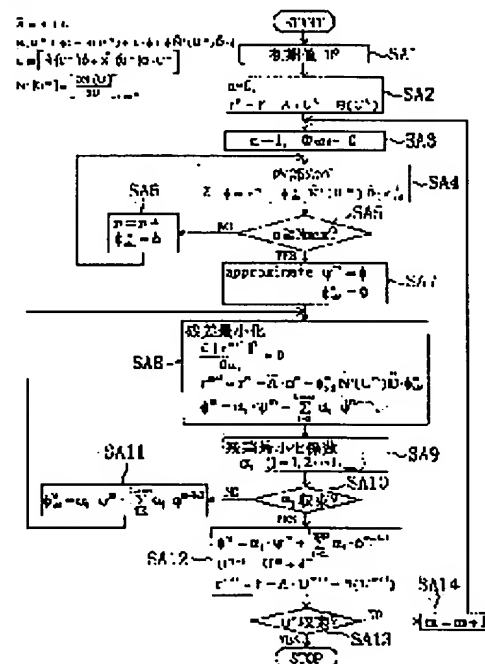
(71)Applicant : KIKUCHI KAZUO
VINAS CO LTD

(22)Date of filing : 30.10.2000

(72)Inventor : TAMURA ATSUHIRO
KIKUCHI KAZUO
IDA AKIHIRO(54) METHOD AND DEVICE FOR CONTROL, RECORDING MEDIUM WITH PROGRAM FOR CONTROL
RECORDED THEREON, METHOD AND DEVICE FOR NUMERICAL CALCULATION, AND RECORDING MEDIUM
WITH PROGRAM FOR NUMERICAL CALCULATION RECORDED THEREON

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method which can surely perform an operation control accompanied by nonlinear phenomenon on at a high speed.

SOLUTION: Denoting a linear differential operator of a nonlinear partial differential equation that a physical quantity U should satisfy as A, a nonlinear differential operator as B, and a nonhomogeneous term (source term) as (f), $A.U+B(U)=f$ is solved by a successive approximation method. At this time, $(f-A.U_m-B(U_m))$ is given as a nonlinear residue rm for an approximate solution U_m , where a repetition frequency is (m) and the approximate solution U_m is corrected so that the nonlinear residue $rm+1$ becomes small.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

20.09.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
examiner's decision of rejection or application
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of
rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision]

of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-140317

(P2002-140317A)

(43)公開日 平成14年5月17日(2002.5.17)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード(参考)

G 0 6 F 17/13

G 0 6 F 17/13

5 B 0 5 6

G 0 5 B 13/02

G 0 5 B 13/02

K 5 H 0 0 4

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 15 頁)

(21)出願番号 特願2000-331314(P2000-331314)

(22)出願日 平成12年10月30日(2000.10.30)

(71)出願人 500503768

菊地 一雄

東京都台東区西浅草3-11-10

(71)出願人 599154087

株式会社ヴァイナス

大阪市西区江戸堀1丁目18番35号 肥後橋

I Pビル

(72)発明者 田村 敦宏

大阪市西区江戸堀1丁目18番35号 肥後橋

I Pビル 株式会社ヴァイナス内

(74)代理人 100077931

弁理士 前田 弘 (外7名)

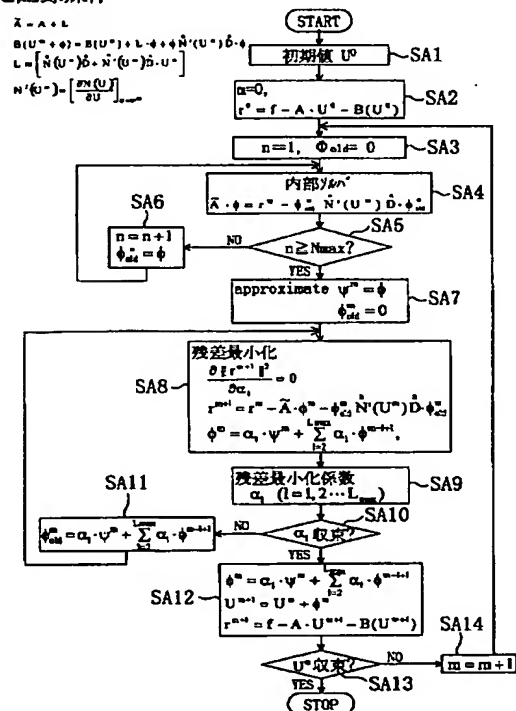
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 制御方法、制御装置および制御用プログラムを記録した記録媒体、並びに数値計算方法、数値計算装置および数値計算用プログラムを記録した記録媒体

(57)【要約】

【課題】 非線形現象を伴う動作制御を、確実かつ高速に行うことができる制御方法を提供する。

【解決手段】 物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項(ソース項)を f としたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解く。このとき、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していく。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 物理量 U を制御する方法であって、
当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、

$$A \cdot U + B(U) = f$$

を、逐次近似法を用いて、解くものであり、

繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差

$$B(U) = \sum_n \hat{N}(U) \hat{D} \cdot U$$

$$\hat{N}(U) \cdots \text{非線型係数}, \quad \hat{D}(U) \cdots \text{微分演算子}$$

と表わすとき、近似解 U^m および摂動量 ϕ に対して、 $N(U^m + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用い

$$B(U^m + \phi) \approx B(U^m) + L \cdot \phi + \phi \sum_n \hat{N}'(U^m) \hat{D} \cdot \phi, \cdots (4)$$

$$L \cdot \phi \equiv \left[\hat{N}(U^m) \hat{D} + \sum_n \hat{N}'(U^m) \hat{D} \cdot U^m \right] \phi, \quad \hat{N}'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial \hat{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$

と表し、

物理量 U の初期値 U^0 を設定し、

繰り返し回数 m に初期値として0を、非線形残差 r の初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定し、

繰り返し回数 m をインクリメントしながら、

【数4】

$$[A + L + \phi \sum_n \hat{N}'(U^m) \hat{D}] \cdot \phi = r^m \cdots (5)$$

の予測近似値 ϕ^m を、反復計算によって求めるステップと、

$$B(U) = \sum_n \hat{N}(U) \hat{D} \cdot U$$

$$\hat{N}(U) \cdots \text{非線型係数}, \quad \hat{D}(U) \cdots \text{微分演算子}$$

と表わすとき、近似解 U^m および摂動量 ϕ に対して、 $N(U^m + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用い

$$B(U^m + \phi) \approx B(U^m) + L \cdot \phi, \cdots (4')$$

$$L \cdot \phi = \sum_n \left[\hat{N}(U^m) \hat{D} + \hat{N}'(U^m) \hat{D} \cdot U^m \right] \phi, \quad \hat{N}'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial \hat{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$

と表し、

物理量 U の初期値 U^0 を設定し、

繰り返し回数 m に初期値として0を、非線形残差 r の初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定し、

r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、

次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していくことを特徴とする制御方法。

【請求項2】 請求項1記載の制御方法において、非線形項 $B(U)$ を、

【数1】

で展開し、 ϕ^2 以上の高次項を無視して、

【数2】

非線形残差 r^{m+1} のノルムを最小とする修正近似値 ϕ^m を、予測近似値 ϕ^m および $\phi^{m-1}, \dots, \phi^{m-L_{\max}+1}$ (L_{\max} は2以上の整数)から求め、
近似解 U^{m+1} として $(U^m + \phi^m)$ を与え、
非線形残差 r^{m+1} として $(f - A \cdot U^{m+1} - B(U^{m+1}))$ を与えるステップとを、近似解 U^m が収束するまで繰り返し実行するものであることを特徴とする制御方法。

30 【請求項3】 請求項1記載の制御方法において、非線形項 $B(U)$ を、
【数1】

繰り返し回数 m をインクリメントしながら、

$$[A + L] \cdot \phi = r^m$$

の予測近似値 ϕ^m を、反復計算によって求めるステップと、

50 非線形残差 r^{m+1} のノルムを最小とする修正近似値 ϕ^m

を、予測近似値 ϕ^0 および $\phi^{0+1}, \dots, \phi^{0+L_{\max}-1}$ (L_{\max} は2以上の整数) から求め、近似解 U^{0+1} として $(U^0 + \phi^0)$ を与え、非線形残差 r^{0+1} として $(f - A \cdot U^{0+1} - B(U^{0+1}))$ を与えるステップとを、近似解 U^0 が収束するまで繰り返し実行するものであることを特徴とする制御方法。

【請求項4】 物理量 U を制御する装置であって、当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、
 $A \cdot U + B(U) = f$
 を、逐次近似法を用いて、解くものであり、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していくことを特徴とする制御装置。

【請求項5】 コンピュータに、物理量 U を制御させるための制御用プログラムを記録した記録媒体であって、当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、
 $A \cdot U + B(U) = f$
 を、逐次近似法を用いて、解くものであり、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していく処理をコンピュータに実行させる制御用プログラムを記録した記録媒体。

【請求項6】 物理量 U の数値計算を行う方法であって、当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、
 $A \cdot U + B(U) = f$
 を、逐次近似法を用いて、解くものであり、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していくことを特徴とする数値計算方法。

【請求項7】 物理量 U の数値計算を行う装置であって、当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、
 $A \cdot U + B(U) = f$

を、逐次近似法を用いて、解くものであり、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していくことを特徴とする数値計算装置。

【請求項8】 コンピュータに、物理量 U の数値計算を行わせる数値計算用プログラムを記録した記録媒体であって、当該物理量 U が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を B 、非斉次項（ソース項）を f としたとき、
 $A \cdot U + B(U) = f$
 を、逐次近似法を用いて、解くものであり、繰り返し回数 m のときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、

$(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように、近似解 U^m を修正していく処理をコンピュータに実行させる数値計算用プログラムを記録した記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、圧力、温度などの物理量を対象とした非線形動作の制御技術に関するものであり、特に、逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御技術に属する。また、物理量を対象とした数値計算技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 従来から、圧力、温度などの物理量を対象とした非線形動作の制御技術において、逐次近似解法アルゴリズムの利用がなされている。逐次近似アルゴリズムとは、様々な最適理論に基づいて、逐次近似を繰り返しつつ、数値計算により最適解を求めるものである。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 ところが、従来の逐次近似解法アルゴリズムでは、非線形方程式を線形化し微少な線形動作の積み重ねで非線形動作を表わせることを前提としており、非線形性の強い現象が生じる場合には、制御動作を決定するための各パラメータの解を求める際に計算の反復回数が膨大となり、計算時間の点から高速かつ高精度の制御が困難であるか、反復計算の途中で計算が発散し解が求まらず制御不能に陥ることがあるなどの点が問題となっている。

【0004】 前記の問題に鑑み、本発明は、従来の方法よりも高速かつ高精度で非線形動作の制御を行うための逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法、制御装置および制御用プログラムを記録した記録媒体を提供することを課題とする。

【0005】

【課題を解決するための手段】前記の課題を解決するために、請求項1の発明が講じた解決手段は、物理量Uを制御する方法として、当該物理量Uが満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰り返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差r

$$B(U) = \sum_n \ddot{N}(U) \ddot{D} \cdot U$$

$$\ddot{N}(U) \cdots \text{非線型係数}, \quad \ddot{D}(U) \cdots \text{微分演算子}$$

と表わすとき、近似解 U^m および摂動量 ϕ に対して、 $N(U^m + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用い

て展開し、 ϕ^2 以上の高次項を無視して、

【数2】

$$B(U^m + \phi) \approx B(U^m) + L \cdot \phi + \phi \sum_n \ddot{N}'(U^m) \ddot{D} \cdot \phi, \cdots (4)$$

$$L \cdot \phi \equiv \left[\ddot{N}(U^m) \ddot{D} + \sum_n \ddot{N}'(U^m) \ddot{D} \cdot U^m \right] \phi, \quad \ddot{N}'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial \ddot{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$

と表し、物理量Uの初期値 U^0 を設定し、繰り返し回数mに初期値として0を、非線形残差rの初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定し、繰り返し回数mをインクリメントしながら、

【数4】

$$[A + L + \phi \sum_n \ddot{N}'(U^m) \ddot{D}] \cdot \phi = r^m \cdots (5)$$

の予測近似値 ϕ^m を、反復計算によって求めるステップと、非線形残差 r^{m+1} のノルムを最小とする修正近似値

ϕ^m を予測近似値 ϕ^m および $\phi^{m-1}, \dots, \phi^{m-L_{\max}+1}$ (L_{\max} は2以上の整数)から求め、近似解 U^{m+1} として $(U^m + \phi^m)$ を与え、非線形残差 r^{m+1} として $(f - A \cdot U^{m+1} - B(U^{m+1}))$ を与えるステップとを、近似解 U^m が収束するまで繰り返し実行するものとする。

【0007】また、請求項3の発明では、前記請求項1の制御方法において、非線形項B(U)を、

【数1】

$$B(U) = \sum_n \ddot{N}(U) \ddot{D} \cdot U$$

$$\ddot{N}(U) \cdots \text{非線型係数}, \quad \ddot{D}(U) \cdots \text{微分演算子}$$

と表わすとき、近似解 U^m および摂動量 ϕ に対して、 $N(U^m + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用い

て展開し、 ϕ 以上の高次項を無視して、

【数23】

$$B(U^m + \phi) \approx B(U^m) + L \cdot \phi, \cdots (4')$$

$$L \cdot \phi \equiv \sum_n \left[\ddot{N}(U^m) \ddot{D} + \ddot{N}'(U^m) \ddot{D} \cdot U^m \right] \phi, \quad \ddot{N}'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial \ddot{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$

と表し、物理量Uの初期値 U^0 を設定し、繰り返し回数mに初期値として0を、非線形残差rの初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定し、繰り返し回数mをインクリメントしながら、 $[A + L] \cdot \phi = r^m$ の予測近似値 ϕ^m を、反復計算によって求めるステップと、非線形残差 r^{m+1} のノルムを最小とする修正近似値 ϕ^m を予測近似値 ϕ^m および $\phi^{m-1}, \dots, \phi^{m-L_{\max}+1}$ (L_{\max} は2以上の整数)から求め、近似解 U^{m+1} として $(U^m + \phi^m)$ を与え、非線形残差 r^{m+1} として $(f - A \cdot U^{m+1} - B(U^{m+1}))$ を与えるステップとを、近似解 U^m が収束するまで繰り返し実行するものとする。

【0008】また、請求項4の発明が講じた解決手段は、物理量Uを制御する装置として、当該物理量Uが満

たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していくものである。

【0009】また、請求項5の発明が講じた解決手段は、コンピュータに物理量Uを制御させるための制御用プログラムを記録した記録媒体として、当該物理量Uが満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として、 $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していく処理をコンピュータに実行させる制御用プログラムを記録したものである。

【0010】また、請求項6の発明が講じた解決手段は、物理量Uの数値計算を行う方法として、当該物理量Uが満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していくものである。

【0011】また、請求項7の発明が講じた解決手段は、物理量Uの数値計算を行う装置として、当該物理量Uが満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していくものである。

【0012】また、請求項8の発明が講じた解決手段は、コンピュータに物理量Uの数値計算を行わせる数値計算用プログラムを記録した記録媒体として、当該物理量Uが満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、 $A \cdot U + B(U) = f$ を逐次近似法を用いて解くものであり、繰返し回数mのときの近似解 U^m に対する非線形残差 r^m として $(f - A \cdot U^m - B(U^m))$ を与え、次のステップの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していく処理をコンピュータに実行させる数値計算用プログラムを記録した

ものである。

【0013】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態について、図面を参照して説明する。

【0014】図1は本発明の実施形態に係る制御装置の構成を示すブロック図であり、本発明に係る制御技術を車両の自動走行制御に応用した例を示している。図1において、車両は、目的値・経路設定部11によって設定される軌道上を許容誤差範囲内で目的地まで自動走行する回路を備えているものとする。走行中は、位置情報検出器12によって、位置・方位情報や速度等の走行情報が検出される。表示器18では設定値や走行状態などの情報がリアルタイムでモニター表示される。

【0015】車両の位置と軌道とのずれ ϕ は情報管理装置13によって常に監視されている。そして、このずれ ϕ が許容値 δ_{max} を越えたとき、そのときの走行情報を出発値として、方向角・角加速度・速度・加速度などの最適化パラメータ制御、すなわち軌道復帰への最適化手段が、本発明に係るアルゴリズムを用いてシミュレーションされる。

【0016】本発明は、逐次近似解法アルゴリズムにおける繰返し演算において、非線形残差を、そのまま用いることを特徴とする。

【0017】（第1の実施形態）図2は本発明の第1の実施形態に係る制御方法を示すフローチャートである。

【0018】（非線形残差方程式の定式化）いま求めたい物理量をUとし、その物理量が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子をA、非線形微分演算子をB、非斉次項（ソース項）をfとしたとき、解くべき式は、

$$A \cdot U + B(U) = f \quad \cdots (1)$$

で表わされる。この式は、一般的には、非線形項B

(U)を線形近似し、SOR法やADI法等の逐次近似法を用いることによって解くことができる。

【0019】本発明では、以下のような解法を用いる。

【0020】式(1)の解Uを、近似解 U^m と摂動量（真の解との差） ϕ とによって、次のように表わす。 $U = U^m + \phi \quad \cdots (2)$

【0021】また、近似解 U^m に対する非線形残差 r^m を次で定義する。

$$r^m = f - A \cdot U^m - B(U^m) \quad \cdots (3)$$

【0022】本発明に係る解法では、摂動量 ϕ を求めて、次のステップでの非線形残差 r^{m+1} が小さくなるように近似解 U^m を修正していくことによって、式(1)の真の解Uを求める。

【0023】非線形項B(U)を、非線形係数および微分演算子を用いて、

【数1】

$$B(U) = \sum_n \dot{N}(U) \dot{D} \cdot U$$

$\dot{N}(U)$... 非線型係数, $\dot{D}(U)$... 微分演算子

と表わすとき、 $N(U^m + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用いて展開し、 ϕ^2 よりも高次項を無視し 【数2】

$$B(U^m + \phi) \approx B(U^m) + L \cdot \phi + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi, \dots (4)$$

$$L \cdot \phi \equiv \left[\dot{N}(U^m) \dot{D} + \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot U^m \right] \phi, \quad \dot{N}'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial \dot{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$

と表わすと、式(1)～(4)から、 【数3】

$$A \cdot (U^m + \phi) + B(U^m + \phi) = f$$

$$\Rightarrow A \cdot (U^m + \phi) + (B(U^m) + L \cdot \phi + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi) = f$$

$$\Rightarrow [A + L + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D}] \cdot \phi = f - A \cdot U^m - B(U^m) = r^m$$

となる。したがって、摂動量 ϕ を求めるためには、次の式を解けばよい。

【数4】

$$[A + L + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D}] \cdot \phi = r^m \dots (5)$$

【0024】(非線形残差切除法のアルゴリズム) 本発明に係るアルゴリズムでは、式(5)の収束解を求めるのではなく、例えば、式(5)の左辺

【数5】

$$\phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi^m$$

において、 ϕ^m を ϕ_{old}^m として右辺に移項することによって、線形化した次式

【数6】

$$[A + L] \cdot \phi = r^m - \phi_{old}^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi_{old}^m$$

をADI法などによって、最も収束勾配の急な最小単位の反復で予測近似値 ϕ^m を求め、求めた予測近似値 ϕ^m を、最適化制御ルーチンに供給する。そして、最適化制御ルーチンの実行結果が所定の条件を満たすまで、一連

の動作を繰り返し実行する。

【0025】<最適化制御ルーチン>いま、繰り返し回数を m としたとき、非線形残差のノルムを最小とする合成摂動量 ϕ^m と新しい近似解 U^{m+1} を次のように定義する。

【数7】

$$\phi^m = \alpha_1 \psi^m + \sum_{l=2}^{L_{max}} \alpha_l \phi^{m-l+1} \dots (6)$$

$$U^{m+1} = U^m + \phi^m \dots (7)$$

【0026】式(6)で α_l ($l=1, 2, 3, \dots, L_{max}$) は残差最小化係数であり、後述する計算方法によって求まる定数である。非線形残差のノルムがより小さくなるように、次のような非線形残差の最小化を行う。

【0027】新しい近似解 U^{m+1} が式(7)で表わされるとき、これに対する非線形残差 r^{m+1} は、式(3)から次のように表わされる。

$$r^{m+1} = f - A \cdot U^{m+1} - B(U^{m+1}) \dots (8)$$

【0028】式(3)、(4)を用いると、式(8)は次のように表わされる。

【数8】

$$\begin{aligned} r^{m+1} &\approx f - A \cdot (U^m + \phi^m) - B(U^m) - L \cdot \phi^m - \phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi^m \\ &= r^m - \left[A + L + \phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \right] \cdot \phi^m \dots (9) \end{aligned}$$

【0029】ここで、

【数9】

$$\tilde{A} = A + L \dots (10)$$

と定義すると、式(9)は次のように表わされる。

【数10】

$$r^{m+1} = r^m - \phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi^m - \tilde{A} \cdot \phi^m \quad \dots (11)$$

【0030】非線形残差の大きさを評価するためのノル

$$\|r^{m+1}\| = \sqrt{\sum_{jk} \left(r^m - \phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi^m - \tilde{A} \cdot \phi^m \right)^2} \quad \dots (12)$$

【0031】この非線形残差 r^{m+1} のノルム $\|r^{m+1}\|$ を最小にするように、残差最小化係数 α_l ($l=1, 2, 3, \dots, L_{\max}$) を最小二乗法によって定める。すなわち、

【数12】

$$\frac{\partial \|r^{m+1}\|^2}{\partial \alpha_l} = 0 \quad (l=1, 2, 3, \dots, L_{\max}) \quad \dots (13)$$

$$\phi^m \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D} \cdot \phi^m$$

が存在するために、 α_l についての非線形連立方程式となるが、これを線形近似し反復計算によって数値的に解くことによって、 α_l が定まる。 α_l が定まると、式(6)から ϕ^m が求まり、式(7)から U^{m+1} が求まる。残差最小化係数 α_l の計算方法については後述する。

【0032】 m をインクリメントしながら、同様のルーチンを繰り返すことによって、式(8)の非線形残差のノルムを零または最小にする解 U に収束させる。

【0033】図2に示すフローチャートに従って、本実施形態に係る制御方法について説明する。

【0034】まず、ステップSA1において、対象物理量 U の初期値 U^0 を設定する。そして、ステップSA2において、繰り返し回数 m に初期値として0を、非線形残差 r の初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定する。

【0035】以下、近似解 U^m が収束するまで、繰り返し回数 m をインクリメントしながら、ステップSA3～SA14を繰り返し実行する。

【0036】ステップSA3～SA7では、

【数14】

$$[\tilde{A} + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D}] \cdot \phi = r^m$$

の近似解(予測近似値) ϕ^m を、この式を線形化することによりADI法、SOR法などの逐次近似法を実行する内部ソルバによって求める。

【0037】本実施形態では、逐次計算の反復回数の上

ムとして、例えば L^2 ノルムを用いるとすると、非線形残差 r^{m+1} のノルム $\|r^{m+1}\|$ は、三次元の場合、 $(r^{m+1})^2$ の内点全ての総和の平方根として、次の式で与えられる。ここで、 i, j, k は三次元座標を表す。

【数11】

を満たすようにする。式(13)は、式(12)右辺に項

【数13】

限 N_{\max} を設定する(ステップSA5, SA6)。

【0038】ステップSA3～SA7において予測近似値 ϕ^0 が求められると、ステップSA8～SA11において、この予測近似値 ϕ^0 を用いて、最適化ルーチンによって、次の非線形残差 r^1 が最小となるように修正値 ϕ^0 を求める。この修正値 ϕ^0 により、第1次の物理量の近似値 U^1 および第1次の非線形残差 r^1 が、式(2), (3)から次式で求められる。

$$U^1 = U^0 + \phi^0 \quad \dots (14)$$

$$r^1 = f - A \cdot U^1 - B(U^1) \quad \dots (15)$$

【0039】ステップSA13で m をインクリメントしてステップSA3に戻り、同様の計算を行う。このような処理を繰り返すことにより、

$(U^2, r^2), (U^3, r^3) \dots (U^m, r^m) \dots$ が順次求められ、非線形残差のノルム $\|r^m\|$ が減少していく。

【0040】繰り返し回数が m のとき、ステップSA4において予測近似値 ϕ^m を求める方程式は、

40 【数14】

$$[\tilde{A} + \phi \sum_n \dot{N}'(U^m) \dot{D}] \cdot \phi = r^m$$

となり、ステップSA12では、最適化制御ルーチンSA8～SA11によって最適化された修正近似値 ϕ^m によって、

$$U^{m+1} = U^m + \phi^m$$

$$r^{m+1} = f - A \cdot U^{m+1} - B(U^{m+1})$$

と求められる。

【0041】(残差最小化係数 α_l の求め方)いま、表記を簡単にするために、次のように δ を導入する。

$$\delta^0 = \phi^0 \\ \delta^{0 \cdot 1 \cdot 1} = \phi^{0 \cdot 1 \cdot 1} \quad (l=2, 3, \dots, L_{\max})$$

とおくと、修正近似値 ϕ^E は、

【数15】

$$\phi^m = \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \delta^{m-l+1} \dots (17)$$

$$r^{m+1} = r^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1} - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \sum_{l'=1}^{L_{\max}} \left(\alpha_l \alpha_{l'} \delta^{m-l+1} \sum_n \tilde{N}(U^m) \tilde{D} \cdot \delta^{m-l'+1} \right) \dots (19)$$

【0042】残差最小化係数 α_l は、最小二乗法を用いて、 $(m+1)$ 次の非線形残差の L^2 ノルムを最小にす

と表わされる。よって、

【数16】

$$r^{m+1} = r^m - A \cdot \phi^m - B(\phi^m) \\ = r^m - \tilde{A} \cdot \phi^m - \phi^m \sum_n \tilde{N}(U^m) \tilde{D} \cdot \phi^m \dots (18)$$

この式に式(17)を代入して、

【数17】

るという条件を与えることによって求められる。

【数18】

$$\|r^{m+1}\|^2 = \sum_{ijk} \left(r^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1} - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \sum_{l'=1}^{L_{\max}} \left(\alpha_l \alpha_{l'} \delta^{m-l+1} \sum_n \tilde{N}(U^m) \tilde{D} \cdot \delta^{m-l'+1} \right) \right)^2 \\ \dots (20)$$

【0043】これを α_l で微分すると、

【数19】

$$\frac{\partial \|r^{m+1}\|^2}{\partial \alpha_l} = 0 \quad (l=1, 2, 3, \dots, L_{\max}) \dots (21)$$

式(21)を α_l について解くことによって、残差最小化係数 α_l を求めることができる。この式は一般に α_l についての非線形連立方程式となるが、線形化し反復計算を行うことによって解く。例えば、式(18)において右辺第三項で ϕ^m を $\phi^{0 \cdot 1 \cdot 1}$ として右辺に移項し、線形化して、

【数20】

$$\tilde{r}^m = r^m - \phi_{old}^m \sum_n \tilde{N}(U^m) \tilde{D} \cdot \phi_{old}^m \dots (22)$$

$$\frac{\partial \|r^{m+1}\|^2}{\partial \alpha_{l'}} = -2 \sum_{ijk} \left[\tilde{r}^m - \tilde{A} \cdot \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \delta^{m-l+1} \right] \tilde{A} \cdot \delta^{m-l'+1}, \quad (l'=1, 2, 3, \dots, L_{\max})$$

$$\therefore \sum_{ijk} \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l+1}) (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l'+1}) = \sum_{ijk} \tilde{r}^m (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l'+1}), \quad (l'=1, 2, 3, \dots, L_{\max}) \dots (24)$$

【0045】式(24)で与えられる L_{\max} 元の連立一次方程式を解くことにより、暫定的に α_l を求め、暫定 α_l を式(17)に代入することにより求める ϕ^m を、新たに $\phi^{0 \cdot 1 \cdot 1}$ として式(22)に代入し、式(24)で与えられる連立一次方程式を解くという反復計算を数回行うことによって、残差最小化係数 α_l を求める。

【0046】(第2の実施形態)図3は本発明の第2の実施形態に係る制御方法を示すフローチャートである。

【0047】(非線形残差方程式の定式化)いま求めたい物理量を U とし、その物理量が満たすべき非線形偏微分方程式の線形微分演算子を A 、非線形微分演算子を

B 、非斉次項(ソース項)を f としたとき、解くべき式

と定義すれば、

20 【数21】

$$r^{m+1} = \tilde{r}^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1}$$

$$\|r^{m+1}\|^2 = \sum_{ijk} (\tilde{r}^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1})^2 \dots (23)$$

【0044】この式を式(21)に代入し、 α_l による微分を実行すると、

【数22】

30

は、第1の実施形態と同様に、

$$A \cdot U + B(U) = f \dots (1)$$

で表わされる。この式は、一般的には、非線形項 B

(U)を線形近似し、SOR法やADI法等の逐次近似法を用いることによって解くことができる。

【0048】本発明では、以下のような解法を用いる。

【0049】式(1)の解を、近似解 U^0 と摂動量(真の解との差) ϕ とによって、次のように表わす。

$$U = U^0 + \phi \dots (2)$$

【0050】また、近似解 U^0 に対する非線形残差 r^0 を次で定義する。

$$r^0 = f - A \cdot U^0 - B(U^0) \dots (3)$$

【0051】本発明に係る解法では、摂動量 ϕ を求めて、次のステップでの非線形残差 r^{n+1} が小さくなるように近似解 U^n を修正していくことによって、式(1)の真の解 U を求める。

$$B(U) = \sum_n \hat{N}(U) \hat{D} \cdot U$$

$$\hat{N}(U) \cdots \text{非線形係数}, \hat{D}(U) \cdots \text{微分演算子}$$

と表わすとき、 $N(U^n + \phi)$ をテーラー展開または平均値の定理を用いて展開し、 ϕ よりも高次項を無視し

$$B(U^n + \phi) \approx B(U^n) + L \cdot \phi, \cdots (4')$$

$$L \cdot \phi = \sum_n \left[\hat{N}(U^n) \hat{D} + \hat{N}(U^n) \hat{D} \cdot U^n \right] \phi, \quad \hat{N}'(U^n) = \left[\frac{\partial \hat{N}(U)}{\partial U} \right]_{U=U^n}$$

と表わすと、式(1)～(4')から、

$$A \cdot (U^n + \phi) + B(U^n + \phi) = f$$

$$\rightarrow A \cdot (U^n + \phi) + (B(U^n) + L \cdot \phi) = f \quad 20$$

$$\rightarrow [A + L] \cdot \phi = f - A \cdot U^n - B(U^n) = r^n$$

となる。したがって、摂動量 ϕ を求めるためには、次の式を解けばよい。

$$[A + L] \cdot \phi = r^n \quad \cdots (5')$$

【0053】(非線形残差切除法のアプローチ)本発明に係るアルゴリズムでは、式(5')の収束解を求めるのではなく、式(5')の左辺を線形化した式をADI法などによって、最も収束勾配の急な最小単位の反復で予測近似値 ϕ^n を求め、求めた予測近似値 ϕ^n を、最適化制御ルーチンに供給する。そして、最適化制御ルーチンの実行結果が所定の条件を満たすまで、一連の動作を繰り返し実行する。

【0054】<最適化制御ルーチン>いま、繰り返し回数を m としたとき、非線形残差のノルムを最小とする合成摂動量 ϕ^n と新しい近似解 U^{n+1} を次のように定義す

$$\begin{aligned} r^{n+1} &\approx f - A \cdot (U^n + \phi^n) - B(U^n) - L \cdot \phi^n \\ &= r^n - [A + L] \cdot \phi^n \quad \cdots (9') \end{aligned}$$

ここで、

【数9】

$$\tilde{A} = A + L \quad \cdots (10)$$

と定義すると、式(9')は次のように表わされる。

【数24】

$$r^{n+1} = r^n - \tilde{A} \cdot \phi^n \quad \cdots (11')$$

【0058】非線形残差の大きさを評価するためのノルムとして、例えば L^2 ノルムを用いるとすると、非線形残差 r^{n+1} のノルム $\|r^{n+1}\|$ は、三次元の場合、 $(r^{n+1})^2$ の内点全ての総和の平方根として、次の式で与えられる。

【0052】非線形項 $B(u)$ を、非線形係数および微分演算子を用いて、

【数1】

る。

【数7】

$$\phi^n = \alpha_1 \psi^n + \sum_{l=2}^{L_{\max}} \alpha_l \phi^{n-l+1} \quad \cdots (6)$$

$$U^{n+1} = U^n + \phi^n \quad \cdots (7)$$

【0055】式(6)で α_l ($l=1, 2, 3, \cdots, L_{\max}$)は残差最小化係数であり、後述する計算方法によって求まる定数である。非線形残差のノルムがより小さくなるように、次のような非線形残差の最小化を行う。

【0056】新しい近似解 U^{n+1} が式(7)で表わされるとき、これに対する非線形残差 r^{n+1} は、式(3)から次のように表わされる。

$$r^{n+1} = f - A \cdot U^{n+1} - B(U^{n+1}) \quad \cdots (8)$$

【0057】式(3)、(4')を用いると、式(8)は次のように表わされる。

【数25】

$$\|r^{n+1}\| = \sqrt{\sum_{qk} (r^{n+1} - \tilde{A} \cdot \phi^n)^2} \quad \cdots (12')$$

【0059】この非線形残差 r^{n+1} のノルム $\|r^{n+1}\|$ を最小にするように、残差最小化係数 α_l ($l=1, 2, 3, \cdots, L_{\max}$)を最小二乗法によって定める。すなわち、

【数12】

$$\frac{\partial \|r^{n+1}\|^2}{\partial \alpha_l} = 0 \quad (l=1, 2, 3, \cdots, L_{\max}) \quad \cdots (13)$$

50 【0060】式(13)は L_{\max} 元の連立一次方程式と

なり、これを数値的に解くことによって α_1 が定まる。 α_1 が定まると、式(6)から ϕ^0 が求まり、式(7)から $U^{0.1}$ が求まる。残差最小化係数 α_1 の計算方法については後述する。

【0061】 m をインクリメントしながら、同様のルーチンを繰り返すことによって、式(8)の非線形残差のノルムを零または最小にする解 U に収束させる。

【0062】図3に示すフローチャートに従って、本実施形態に係る制御方法について説明する。

【0063】まず、ステップSB1において、対象物理量 U の初期値 U^0 を設定する。そして、ステップSB2において、繰り返し回数 m に初期値として0を、非線形残差 r の初期値 r^0 として $(f - A \cdot U^0 - B(U^0))$ を設定する。

【0064】以下、近似解 U^0 が収束するまで、繰り返し回数 m をインクリメントしながら、ステップSB3～SB12を繰り返し実行する。

【0065】ステップSB3～SB6では、
【数26】

$$\tilde{A} \cdot \phi = r^m$$

の近似解(予測近似値) ϕ^0 を、ADI法、SOR法などの既存の逐次近似法を実行する内部ソルバによって求める。ところがこの式は、既存の逐次近似法で解こうとすると、実用問題に対しては収束までに多くの反復回数を必要とし、計算時間も膨大となる。

【0066】そこで、本実施形態では、逐次計算の反復回数の上限 N_{\max} を設定する(ステップSB5、SB6)。

【0067】ステップSB3～SB6において予測近似値 ϕ^0 が求められると、ステップSB8、SB9において、この予測近似値 ϕ^0 を用いて、最適化ルーチンによって、次の非線形残差 r^1 が最小となるように修正値 ϕ^0 を求める。この修正値 ϕ^0 により、第1次の物理量の近似値 U^1 および第1次の非線形残差 r^1 が、式(2)、(3)から次式で求められる。

$$U^1 = U^0 + \phi^0 \quad \dots (14)$$

$$r^1 = f - A \cdot U^1 - B(U^1) \quad \dots (15)$$

【0068】ステップSB13で m をインクリメントしてステップSB3に戻り、同様の計算を行う。このような処理を繰り返すことにより、

$(U^2, r^2), (U^3, r^3) \dots (U^m, r^m) \dots$ が順次求められ、非線形残差のノルム $\|r^0\|$ が減少していく。

$$\frac{\partial \|r^{m+1}\|^2}{\partial \alpha_l} = -2 \sum_{ijk} \left[r^m - \tilde{A} \cdot \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \delta^{m-l+1} \right] \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1}, \quad (l=1, 2, 3, \dots, L_{\max})$$

$$\therefore \sum_{ijk} \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l+1}) (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l+1}) = \sum_{ijk} r^m (\tilde{A} \cdot \phi^{m-l+1}), \quad (l=1, 2, 3, \dots, L_{\max}) \quad \dots (22')$$

【0069】繰り返し回数が m のとき、ステップSB4において予測近似値 ϕ^0 を求める方程式は、
【数26】

$$\tilde{A} \cdot \phi = r^m$$

となり、ステップSB12では、最適化制御ルーチンSB8、SB9によって最適化された修正近似値 ϕ^0 によって、

$$U^{0.1} = U^0 + \phi^0$$

$$r^{0.1} = f - A \cdot U^{0.1} - B(U^{0.1})$$

と求められる。

【0070】(残差最小化係数 α_1 の求め方)いま、表記を簡単にするために、次のように δ を導入する。

$$\delta^0 = \phi^0$$

$$\delta^{0.1.1} = \phi^{0.1.1} \quad (l=2, 3, \dots, L_{\max})$$

とくと、修正近似値 ϕ^0 は、

【数15】

$$\phi^m = \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \delta^{m-l+1} \quad \dots (17)$$

と表わされる。よって、

【数27】

$$\begin{aligned} r^{m+1} &= r^m - A \cdot \phi^m - B(\phi^m) \\ &= r^m - \tilde{A} \cdot \phi^m \quad \dots (18') \end{aligned}$$

【0071】この式に式(17)を代入して、

【数28】

$$r^{m+1} = r^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1} \quad \dots (19')$$

【0072】残差最小化係数 α_1 は、最小二乗法を用いて、 $(m+1)$ 次の非線形残差の L^2 ノルムを最小にするという条件を与えることによって求められる。

【数29】

$$\|r^{m+1}\|^2 = \sum_{ijk} \left(r^m - \sum_{l=1}^{L_{\max}} \alpha_l \tilde{A} \cdot \delta^{m-l+1} \right)^2 \quad \dots (20')$$

これを α_1 で微分すると、

【数19】

$$\frac{\partial \|r^{m+1}\|^2}{\partial \alpha_l} = 0 \quad (l=1, 2, 3, \dots, L_{\max}) \quad \dots (21)$$

α_1 による微分を実行すれば、

【数30】

式(24')で与えられる L_{max} 元の連立一次方程式を解くことにより、残差最小化係数 α_1 を求めることができる。

【0073】第1または第2の実施形態に係るアルゴリズムを図1に示す車両の走行制御に適用した場合には、まず予測修正量演算部14によって、現在の走行情報を基にして予測修正量 ψ^* が反復計算される。次に、最適加算修正量演算部15によって m 次の加算修正量 ϕ^* が演算される。予測修正量演算部14および最適加算修正量演算部15によって求められた解は、最終的に修正量収束判定部16によって収束が判定され、所定の軌道に復帰するための最適制御方法が決定される。決定された制御情報は方向制御部17に送られ、車両の走行経路が修正される。

【0074】なお、ここでは車両の走行制御を例にとって本発明について説明したが、他の分野の様々な制御にも本発明は利用可能であることはいうまでもない。

【0075】また、上記の制御方法は、当該方法を実現するためのプログラムを実行するコンピュータを備えた装置によって容易に実現することができる。また、当該方法を

【0076】なお、非線形項 $B(U^* + \phi)$ を近似的に表す際に、第1の実施形態では、非線形係数の展開の式において二次よりも高次項を無視し、第2の実施形態では一次よりも高次項を無視したが、展開を打ち切る次数はこれらに限られるものではない。ただし、プログラム作成の容易さなどを鑑みれば、一次または二次までで展開を打ち切るのが、実用的であると考えられる。

【0077】(数値計算への応用)本発明に係るアルゴリズムは、数値計算に応用することも可能である。

【0078】図4は数値計算への応用例として、二次元Thompson型格子生成手法の非線形連立方程式に適用した場合を示している。また図5は図4の応用例における収束速度を比較するためのグラフであり、(a)は従来の線形残差切除法を利用した場合、(b)は本発明の第1の実施形態に係る非線形残差切除法を利用した場合を示している。縦軸は非線形残差(対数表現)、横軸は繰返し回数である。図中、細線で格子点の x 座標を求める式

の非線形残差がプロットされ、太線で格子点の y 座標を求める式

の非線形残差がプロットされている。図7から、従来の手法では収束しなかった場合でも、本発明によって、収束していることが分かる。

【0079】同様に、図6は数値計算への応用例として、二次元Thompson型格子生成手法の非線形連立方程式に適用した場合を示している。また図7は図6の応用例における収束速度を比較するためのグラフであり、(a)は従来の線形残差切除法を利用した場合、(b)は本発明の第2の実施形態に係る非線形残差切除法を利用した場合を示している。縦軸は非線形残差(対数表現)、横軸は繰返し回数である。図中、一点鎖線で格子点の x 座標を求める式

の非線形残差がプロットされ、太線で格子点の y 座標を求める式

の非線形残差がプロットされている。図7から、従来の手法では収束しなかった場合でも、本発明によって、収束していることが分かる。

【0080】なお、このような数値計算への応用は、当該方法を実現するためのプログラムを実行するコンピュータを備えた装置によって容易に実現することができる。また、当該方法を実現するためのプログラムをコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録して、この記録媒体に記録したプログラムをコンピュータに実行させることによって実現することができる。

【0081】

【発明の効果】以上のように本発明によると、非線形残差を直接取り扱い、これを減少させる逐次近似解法アルゴリズムを用いているので、非線形性の強い非線形動作の制御動作を、確実かつ高速に行うことが容易になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態に係る制御装置の構成を示すフローチャートである。

【図2】本発明の第1の実施形態に係る制御方法を示すフローチャートである。

【図3】本発明の第2の実施形態に係る制御方法を示すフローチャートである。

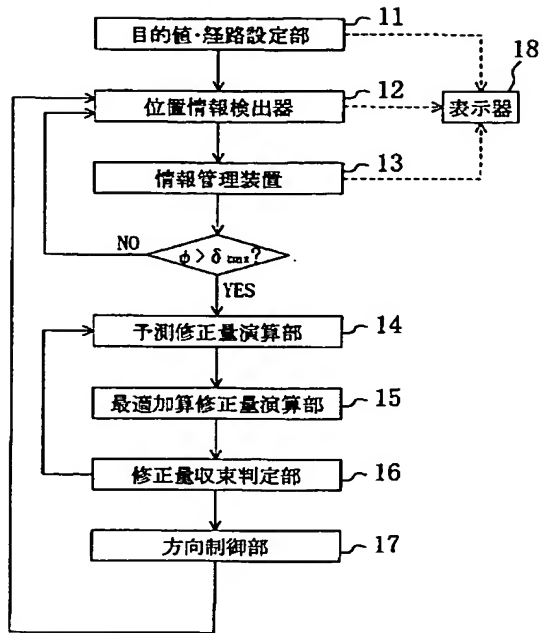
【図4】本発明に係るアルゴリズムを適用した格子生成の一例を示す図である。

【図5】図4の例における収束速度の比較を示すグラフである。

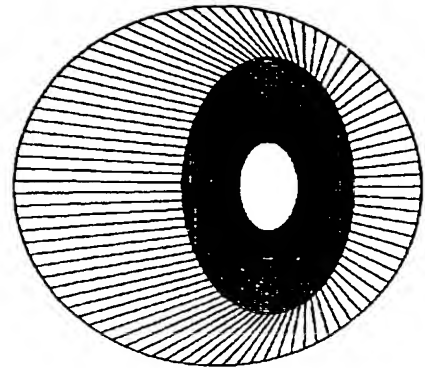
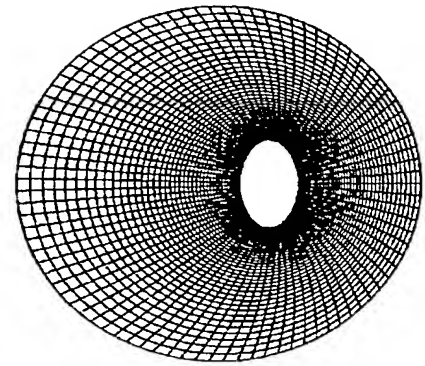
【図6】本発明に係るアルゴリズムを適用した格子生成の一例を示す図である。

【図7】図6の例における収束速度の比較を示すグラフである。

【図1】



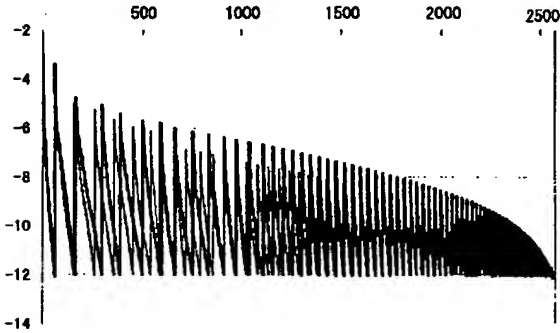
【図4】

(a)
制御前(b)
制御後

【図5】

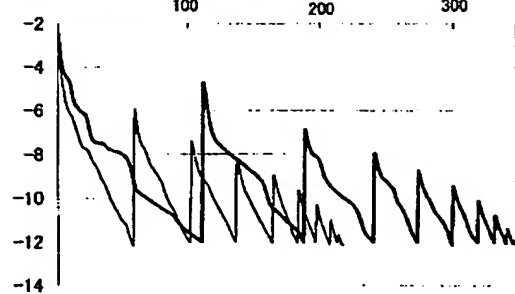
(a)

収束履歴 (線形残差切除法)

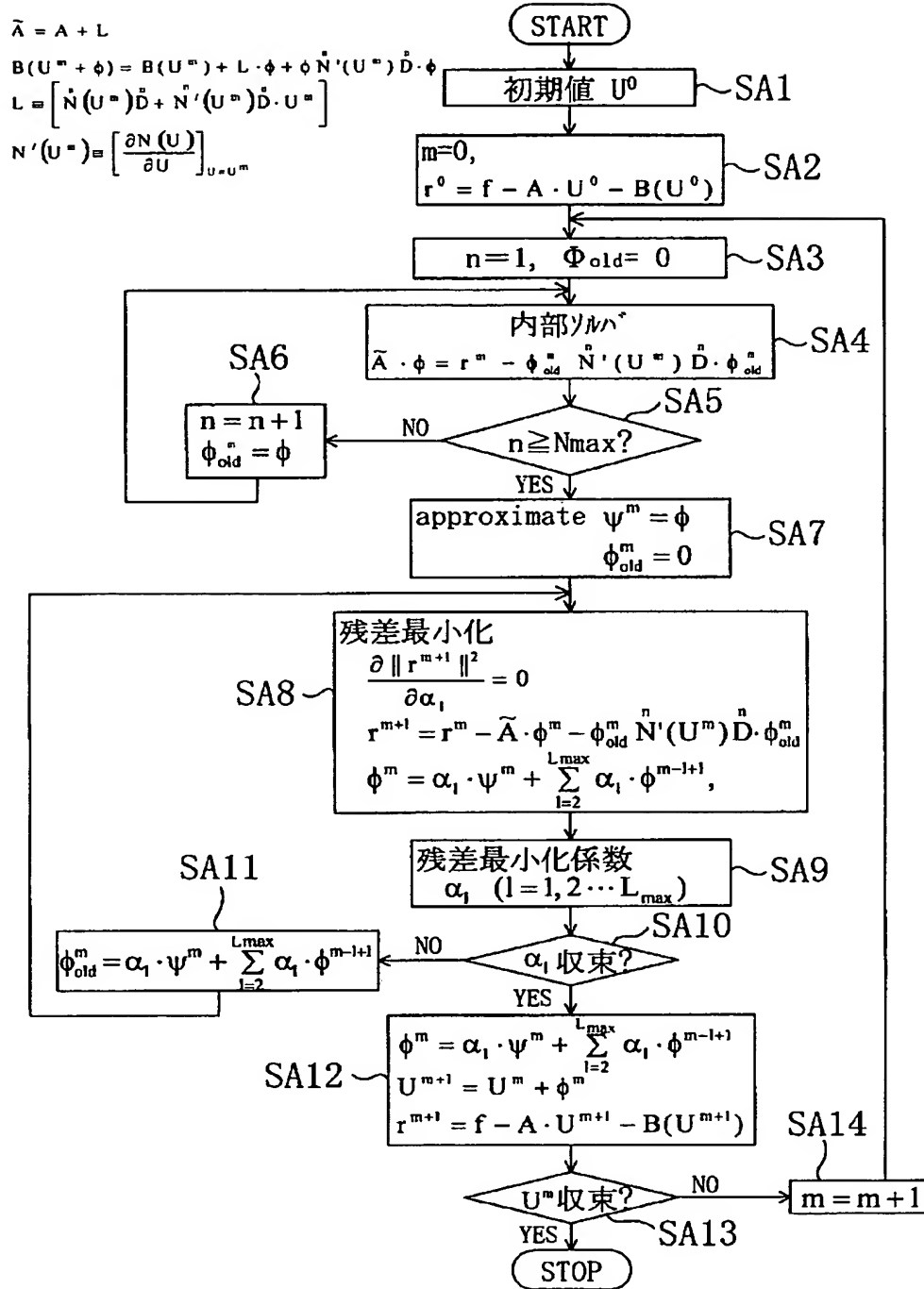


(b)

収束履歴 (非線形残差切除法)



【図2】



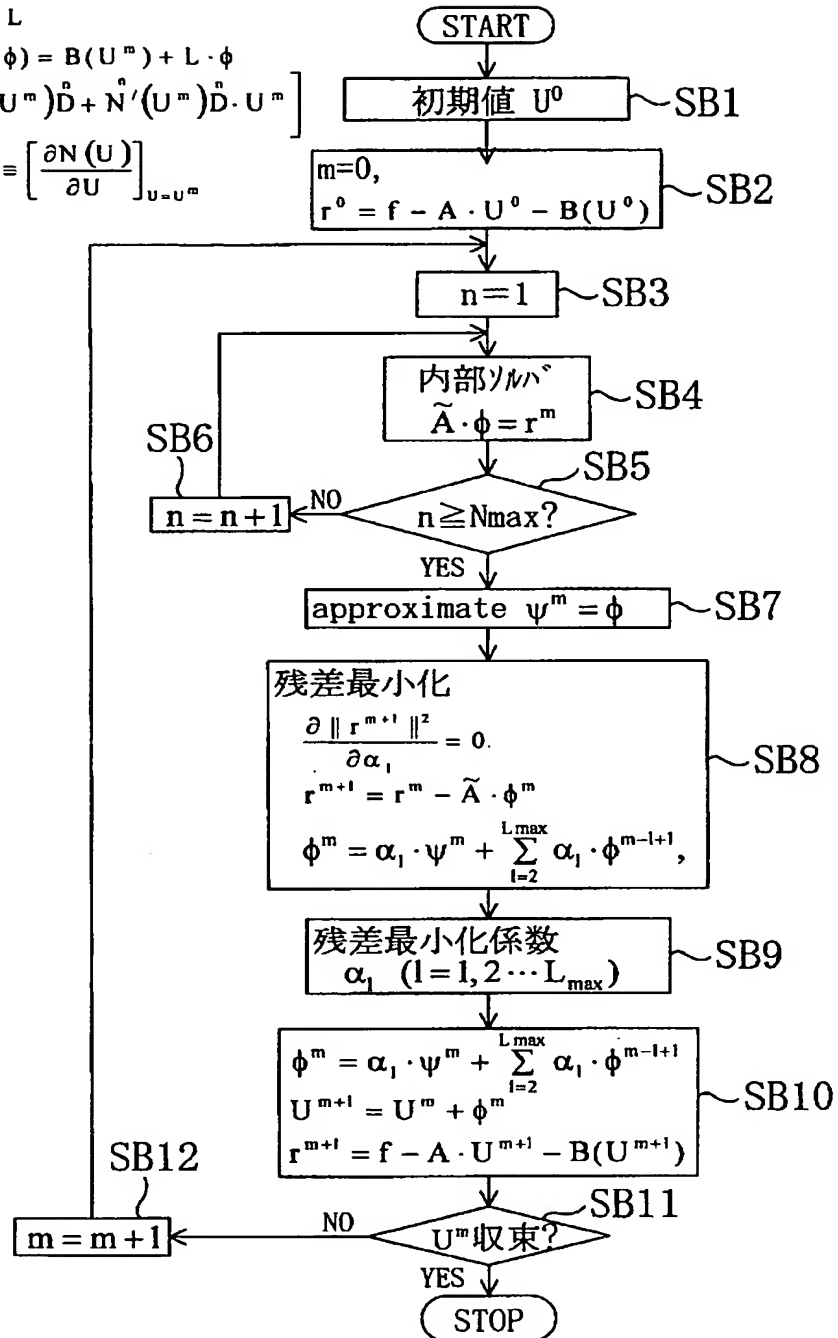
【図3】

$$\tilde{A} = A + L$$

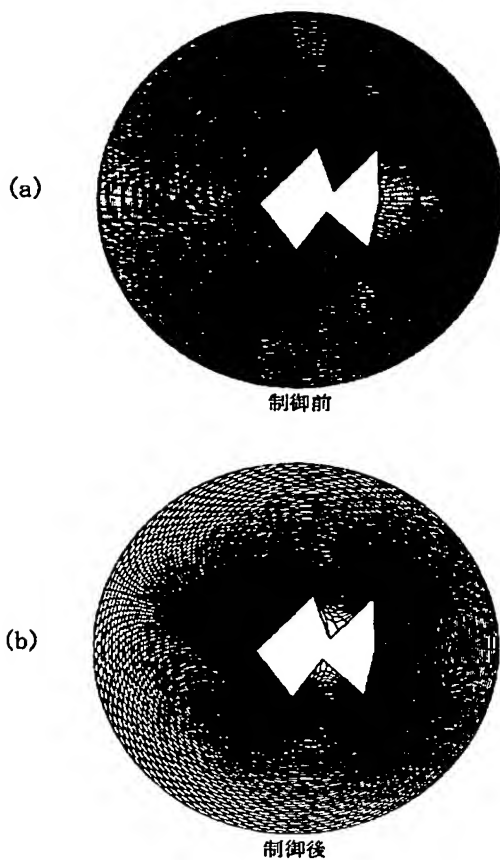
$$B(U^m + \phi) = B(U^m) + L \cdot \phi$$

$$L \equiv \left[\tilde{N}(U^m) \tilde{D} + \tilde{N}'(U^m) \tilde{D} \cdot U^m \right]$$

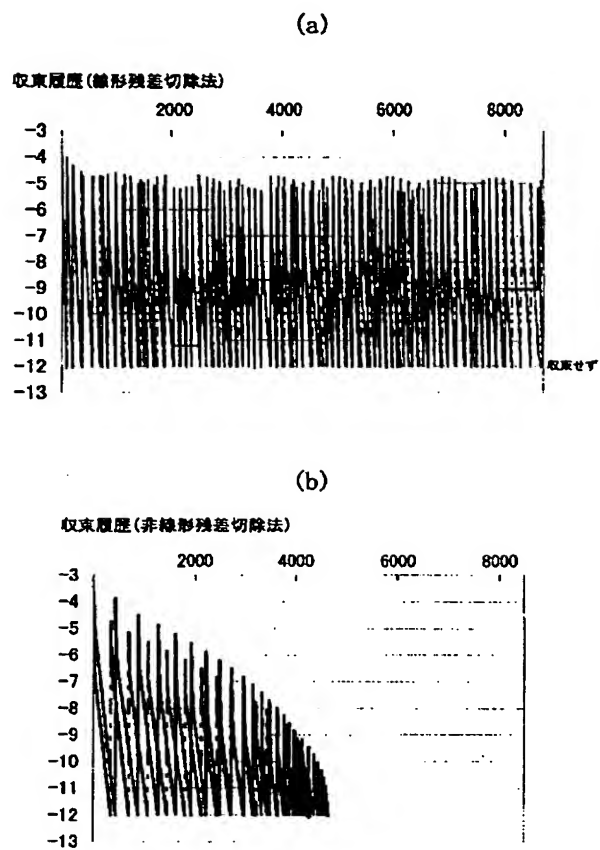
$$N'(U^m) \equiv \left[\frac{\partial N(U)}{\partial U} \right]_{U=U^m}$$



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 菊地 一雄
東京都台東区西浅草3-11-10

(72)発明者 伊田 明弘
大阪市西区江戸堀1丁目18番35号 肥後橋
I Pビル 株式会社ヴァイナス内
Fターム(参考) 5B056 AA06 BB04
5H004 GA18 GB01 GB12 KC08 KC12
LA05 LA12